

文章编号: 0258-7025(2010)08-1978-05

通过海气界面的上行激光光场分布

周田华^{1,2} 陈卫标^{1,2} 贺岩^{1,2} 朱小磊^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光技术与应用系统实验室, 上海 201800)
² 上海市全固态激光器及应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 激光雷达在海洋遥感、测绘及监测等应用中具有重要前景。海面由于各种因素总存在一定粗糙度, 影响水下激光穿过海气界面后的光学特性, 导致出射光束漂移和光斑畸变, 使得出射光场分布特性复杂, 成为制约激光在海洋环境上下行有效传输的重要问题。为了分析海气界面对激光传输的影响, 基于几何光学理论分析、三维海浪模拟和蒙特卡罗仿真, 并辅以水池观测实验加以验证, 对水下向上传输激光束通过海气界面的出射光场分布特性进行研究。结果表明, 在上行准直激光束垂直向上发射的情况下, 光束主要集中在中心指向 $\pm 10^\circ$ 范围以内, 通过采用合理的发射方式和设置适当的技术参数, 将可以在一定程度上减弱海气界面的影响, 促进激光在海洋相关领域的实际应用。

关键词 大气与海洋光学; 海气界面; 三维海浪模拟; 蒙特卡罗法; 水下激光

中图分类号 TN929 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.1978

Beam Spatial Distribution of Upward Laser Through Sea-Air Interface

Zhou Tianhua^{1,2} Chen Weibiao^{1,2} He Yan^{1,2} Zhu Xiaolei^{1,2}

(¹ Advanced Laser Technique and Applied system Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai, 201800, China)

Abstract Lidar has been used for ocean remote sensing widely. The upward laser beam is distorted due to the rough sea surface. It limits dramatically laser transmission through sea surface and the application of Lidar under water. The beam distribution of upward laser beam through sea surface is studied based on the geometric optical theory, three dimension wave simulation and Monte Carlo simulation respectively. Results show similar beam distribution by the three methods. The beam profile is limited in $\pm 10^\circ$ for collimated vertical upward beam. Demonstration of beam distribution through man-made rough water surface is conducted in a water tank. Results show that the exit angle is actually limited within $\pm 10^\circ$. The study will be useful to the design of Lidar application under sea water.

Key words atmospheric and ocean optics; sea-air interface; 3D wave simulation; Monte Carlo method; underwater laser

1 引言

海洋激光雷达等领域其传输信道包含各种不确定性因素, 海气界面是激光传输信道的重要组成部分, 对整个应用系统的性能有不可忽视的影响。由于风的作用, 海面变得粗糙, 海面的法线方向随之改变, 从而影响激光的反射和折射, 导致水下出射光斑的光束漂移、光斑畸变和能量分布的变化, 对激光雷

达系统性能影响较大。而海浪是十分复杂的随机现象, 影响海浪的因素很多, 即使在同一条件下, 所呈现的海浪也不是完全确定的^[1~3]。然而海浪虽然具有随机性, 但也具有一定的规律性。王岩峰等^[4~7]的研究结果表明海面倾角分布近似服从高斯分布, 同时随着风速增大, 大角度的波面倾角概率增加, 然而总的来说海面倾角主要集中在 $\pm 30^\circ$ 以内。本文

收稿日期: 2009-11-12; 收到修改稿日期: 2009-12-01

作者简介: 周田华(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: siomzth@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光雷达遥感遥测方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn(通信联系人)

主要针对水下垂直上传激光穿过海气界面后的光场分布进行研究,基于直射光束的几何光学理论分析,辅以三维海浪模拟和进一步考虑散射光束的蒙特卡罗仿真,并结合水池实验实际观测数据加以验证,探索水下激光穿越海气界面后的光场分布统计特性。

2 理论模型

2.1 几何光学理论分析

由于水面风浪波长尺寸远大于激光波长,采用几何光学进行分析是适用的^[3]。入射的激光束可以看成是由若干激光光线组成,为简化讨论,下面主要基于一维海浪针对垂直向上发射的入射光线进行分析,分析结论可以扩展到二维海浪情形。考虑准直、垂直向上、发散角为零的中心光束,由于实际海况几乎不存在绝对的静止水面,当海面存在波面倾角 R ,则相对于该倾斜波面新法线的入射角随之变为 $+R$ 或者 $-R$,相对于新法线的出射角 γ' 随之相应发生变化。为描述波面存在倾角的前后变化,定义波面倾角 R 从水平轴线顺时针向下为负,逆时针向上为正,如图 1 所示。则根据几何光学基本原理,水下激光束穿过海气界面后光斑的出射角 γ' 分布情形为^[8]

$$\gamma' = \arcsin(1.33 \sin R) - R. \quad (1)$$

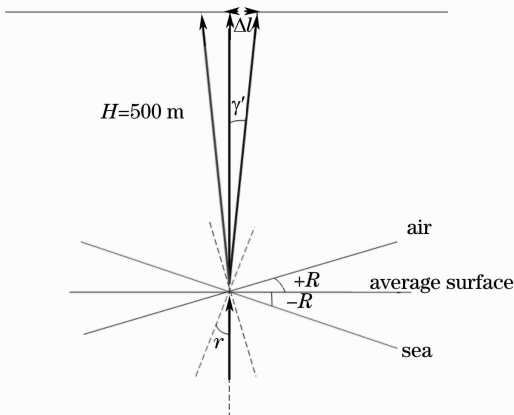


图 1 存在波面倾角时的水下激光垂直向上入射光路示意图

Fig. 1 Upward light path schematic diagram with the slope R

根据 Cox 理论模型^[6,7],当海面风速在 10 m/s 以下时,海面倾角通常不超过 30° ,此外当海面倾角超过 30° 后,发生全发射的几率大幅增加,尤其当海面倾角达到 48° 后,海气界面处非常容易发生全反射,导致水下光束不能有效通过海面,极大地降低了

系统性能。基于上述分析,图 2 从实际使用的角度出发,计算了倾角从 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 变化时的出射角分布。由图 2 可知海面倾角在最大 30° 的情况下,水下垂直入射光束穿过海气界面后出射角度主要集中在 $\pm 10^\circ$ 范围内。

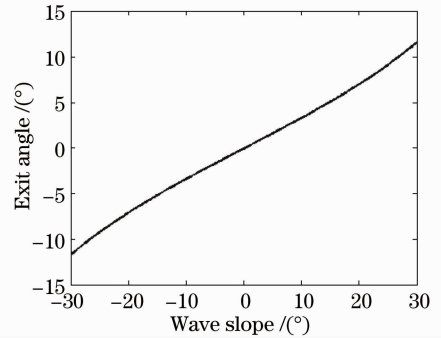


图 2 不同海面倾角下的出射角度

Fig. 2 Relationship of the exit angle with the slope of sea surface

2.2 三维海浪模拟

几何光学理论分析给出了明确的出射角分布情形,但出射光场分布不够直观,并忽略了水下光源所处水深和照射到海面的光斑尺寸的影响。基于几何光学原理,在只考虑直射光束的情况下,进一步加入水深和海面光斑尺寸因素,可通过三维海浪模拟直观模拟得到三维海浪情况下、水下激光垂直向上入射穿越海气界面后的光场分布特性。

海浪的模拟通常是通过海浪谱来实现的,由海浪谱计算产生海浪的有关数据,可以反演模拟海浪。常用的海浪谱有 Neumann 谱, Pierson-Moscowitz (P-M)谱, JONSWAP 谱和文氏谱等,本文海浪频谱选择 P-M 谱,方向分布函数选择国际船模水池会议 (ITTC)的建议形式,采用线性叠加法模拟海浪^[5]

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \epsilon_{ij}). \quad (2)$$

通过对频谱和方向角的离散化得到相应的有限个谐波,将它们叠加就得到了三维随机海浪。式中 $z(x, y, t)$ 表示任意时刻随机海浪波面上任意一点的波高, a_{ij} , ω_i , k_i , θ_j 分别为各次组成波的振幅、角频率、波数和方向角,初相位 ϵ_{ij} 是 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机变量, t 为时间矢量。在模拟生成的三维波面的基础上利用面元划分和几何光学分析就可以进一步得到水下光束穿过海气界面后的光场分布。随机面元有限划分的基本思想是光束分割,将水下垂直向上、零发散角的激光束分割为多束垂直向上发射的子光

束,每个子光束覆盖的海面区域即是一个小面元。考虑准直、垂直向上、发散角为零的入射光束,如图3所示,水下光源位于 $M(0,0,-h)$,空中观测平面 Π_1 高度为 h_1 , $M_0(x_0,y_0,z_0)$ 为上行子光束与随机起伏海面小面元的交点, $M'_0(x'_0,y'_0,z'_0)$ 为法线与平面 Π_1 的交点, $M_1(x_1,y_1,z_1)$ 为水下光束穿过小面元后在观测平面的出射位置。在每个小面元上通常的反射定律和折射定律成立,面元的透射率取决于该子光束的入射角度和面元的倾斜程度,通过每个小面元的光束到达接收机所在的平面时,所有这些小光斑的集合就是水下激光束通过随机起伏的海面后在观察平面上形成的光斑。通过对接收平面上的光斑进行统计分析,即可总结出激光通过随机起伏海面的传输规律。当水下光源存在一定发散角时,随着深处的增加,对应海面光斑尺寸相应增大,覆盖更多的海浪波长,海气界面的影响将在一定程度上得到平滑。

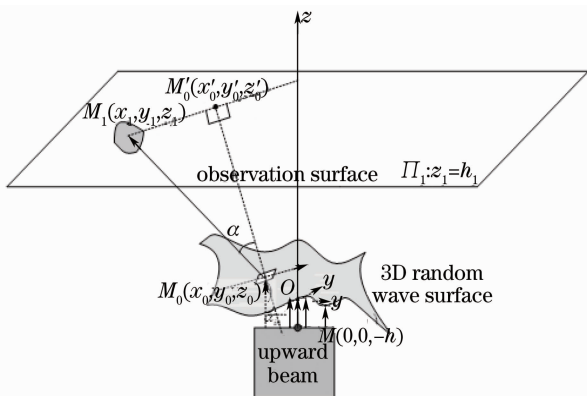


图3 上行激光通过模拟三维随机海面

Fig. 3 Simulation of the upward laser beam through the 3D random surface

基于三维海浪模型,同样对于准直向上传输光束,水下光源位于50 m深处、空中观察高度500 m处,当海面风速 U 为10 m/s,10 ms间隔模拟连续三维海浪表面,1000次水下光束穿过模拟动态随机海气界面后的迭加结果统计指向分布如图4所示。由图可知对于出射光束主要集中在中心 $\pm 10^\circ$ 范围内,这与考虑 30° 最大倾角时的几何光学理论分析计算结果是基本相符合的,也间接证明了海浪模型的正确性。可以看出光斑的能量仍然主要落在中心附近一个较小的分布范围内,且主方向出现的概率和强度都是最大的,进一步深入的数据分析显示出射光场的能量分布从统计的角度依然服从高斯分布。同时由于海浪运动的方向性,出射光束呈现在海浪运动方向上的一定范围的波动。

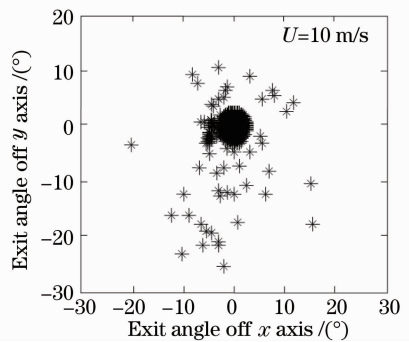


图4 三维海浪模拟统计结果

Fig. 4 Statistical results of 3D wave simulation

3 蒙特卡罗仿真

三维海浪模拟针对的主要是直射光束,给出了直观而形象的出水光学特性,但忽略了散射的影响,结合海水的吸收和散射特性,蒙特卡罗模拟将进一步给出更精确的结果^[9,10]。

3.1 蒙特卡罗模拟流程

激光脉冲在整个传输信道中的传输特性,属于静态 Monte Carlo 算法^[1,2]。为了增加模拟的效率,光子按照光子包处理。首先根据仿真的实际要求设定光子包的初始参数,主要包括空间位置 (x,y,z) ,方位角 β ,极角 α 及初始权重 w ^[9,10];其次根据信道衰减和散射特性,更新每次传输变化后的方向和权重;最后在观察高处统计到达此处的光子包参数即可得出光场分布。

光子包在介质中传输,传输距离 l 后与介质中的粒子发生碰撞,即散射。传输距离 l 可确定为

$$l = -\frac{\ln(f_{\text{rnd}})}{\mu_a + \mu_s}, \tag{3}$$

式中 μ_a 和 μ_s 分别是介质吸收和散射系数, f_{rnd} 是 $(0,1)$ 之间均匀分布随机数。此时,光子包新的空间位置为

$$\begin{cases} x' = x + l \sin \beta \cos \alpha \\ y' = y + l \sin \beta \sin \alpha \\ z' = z + l \cos \beta \end{cases} \tag{4}$$

在散射中光子包要损失能量,表示成损失的权重是

$$\Delta w = w \frac{\mu_a}{\mu_a + \mu_s}, \tag{5}$$

这部分损失的能量是介质中粒子吸收的能量。由于散射作用,光子包的传输方向要发生变化。散射方向与粒子的类型有关,如果是 Mie 散射,则按照 Mie 散射的相函数决定散射方向;如果是 Rayleigh 散射,则应遵照 Rayleigh 散射相函数^[11]。当光子包传

输到海气界面时,为了模拟激光在海气界面的反射和折射,必须知道海面的法线方向与垂直方向的夹角,基于 Cox 和 Munk 的研究结果,海面法线方向与垂直方向夹角为 R 的概率近似为^[1,2,4,6]

$$P(R) = \frac{2}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\tan^2 R}{\sigma^2}\right) \tan R \sec^2 R, \quad (6)$$

$$\sigma^2 = 0.003 + 0.00512U$$

数值模拟得出 R 后,可根据(1)式计算出水下激光相对于新法线的入射角 θ_i ,根据此时光子包入射角再按照 Snell 定律

$$R_{it} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right], \quad (7)$$

基于随机生成的 R_{it} 计算折射角 θ_t ,并判断光子包是反射还是折射,从而确定新的光子包传输方向。光子包一直在介质中传输,它的权重(能量)也因为介质吸收不停地减少。当光子包的权重低于一个阈值时,它将被终止,然后初始新的光子包,进行新一轮的计算,一直到所有的光子包全部仿真完。

3.2 蒙特卡罗模拟结果

水下光源位于 50 m 深处、空中观察高度 500 m 处光子包统计结果如图 5 所示。出射光束指向基本上都在 $\pm 10^\circ$ 范围内,与理论分析的结果基本相符,光斑的能量仍然主要落在预定的分布范围内,且主方向出现的概率和强度都是最大的,由于散射的影响,在 $\pm 10^\circ$ 以外也存在一定的出射光线。

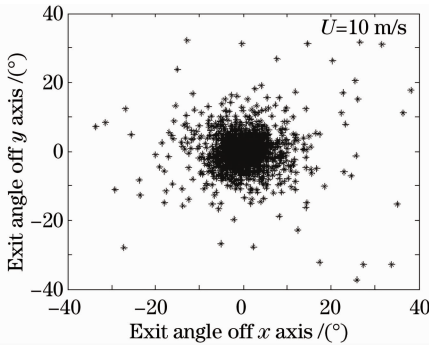


图 5 蒙特卡罗仿真结果

Fig. 5 Result of Monte Carlo simulation

4 水池验证实验

几何光学理论分析、三维海浪模拟和蒙特卡罗仿真结果都一致表明水下准直上行激光束垂直向上传输穿越海气界面后的光束主要分布在正上方中心 $\pm 10^\circ$ 范围内。为了进一步获取水下激光穿越海气界面后的实验数据,研究海气界面对激光向上传输的影响,验证上述理论分析和计算机仿真的可信性,

借鉴海面微结构光学测量的经验^[4,6,12],水池实验光路图如图 6 所示。连续激光通过水池底部的玻璃窗口进入水体传输、垂直向上指向像屏,放置在上方的光电接收机接收后送数字存储示波器实时显示和数据采集卡采集。试验当中为了观察波浪的影响,将使用造波机进行海浪模拟,并在像屏处设置了一个 CCD 进行实时俯视监控。在水面处设置了一台摄像机进行仰视拍摄,在试验的过程当中将利用 CCD 和摄像机分别记录水面光斑和水面形状、像屏处光斑及其形状变化情况,从而可以通过获得的水面和空中的光斑大小计算出水后的激光特性,并对光斑的畸变、漂移、能量波动和光场分布有直观的认识。

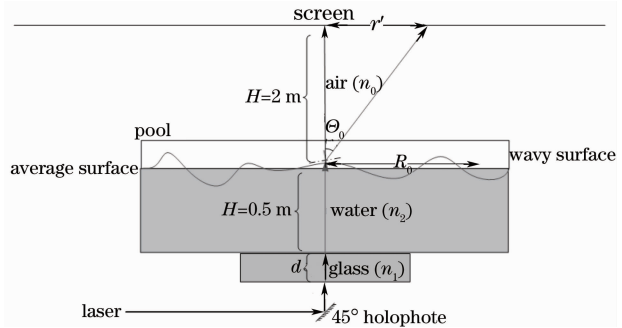


图 6 水池实验光路图

Fig. 6 Light-path diagram of the pool experiment

综合利用简易推板式规则波造波机、可调风量风扇和可调流量造浪器,在水池水深 0.5 m,模拟波高达到 5 cm,波陡接近 1/7 和波面倾角最大约 30° 的情况下,利用 CCD 对像屏上的光斑分布迭加 1000 幅连续的图片后获得了模拟风浪情形下的出射光场分布,如图 7(a)所示。可以看出光斑主要仍然集中在中心区域预定指向范围内,随着水面的波动,由于水面倾角的存在,出射光束不再完全保留在正上方,而是产生了漂移和光斑畸变^[8~12],鉴于水池实验设施的简陋,难以模拟上述分析时的真实风

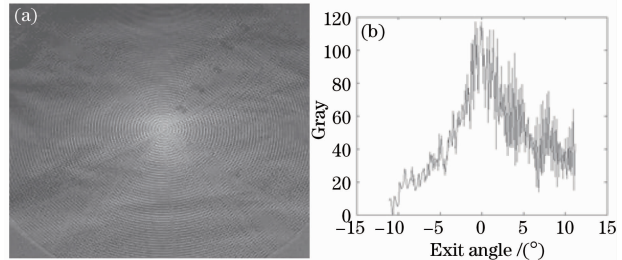


图 7 CCD 迭加统计结果。(a)迭加后的光场分布;

(b)出射角度分布曲线

Fig. 7 Superposition results of CCD photos. (a) optical field distribution photo; (b) optical field distribution curve

浪环境,通过对像屏上刻度的解读,如图 7(b)所示,实际测量光束偏离预定指向范围基本上不超过 10° ,并主要集中在中心 5° 范围以内,可以看出光斑分布依然近似为高斯分布,实验结果在理论分析与仿真结果的分布范围以内。

5 结 论

几何光学理论分析、三维海浪模拟、蒙特卡罗仿真和水池实验观测结果都表明水下激光受海气界面的影响,会产生光束漂移、光斑畸变等现象。当海面倾角不大于 30° 时,出射光束分布主要集中在光斑中心 10° 范围以内。统计光场分布曲线近似服从高斯分布,中心指向光场最强,随着偏移距离的增加,光场分布明显减弱。对于水下发射光束而言,水面光斑太小,则由于在海面上近似集中为一点则会随着海浪的运动而存在完全偏出的可能,因而实际应用时必须要有-定的光斑尺寸,光斑尺寸大,则随着海浪的运动仍然保留能量指向的时间越长,然而光斑过大,能量扩散损耗严重,有效利用率太低,因而这些因素需要折中考虑。对于海面光斑的基本要求应该为包含至少一个波长,包含的波长数越多,能量波动和分布越稳定。由于真实海浪的复杂性,本文三维海浪模拟和蒙特卡罗仿真所采用模型以及水池实验很难做到与真实海况一致,只能在一定程度上模拟以重力波为主的充分成长波。

参 考 文 献

- 1 Liu Jintao, Chen Weibiao. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1441~1446
刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1441~1446

- 2 Liang Bo, Zhu hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~1172
梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 3 Si Lihong, Ao Faliang, He Ning. Behavior analysis of laser beam traversing the sea surface[J]. *J. Guilin University of Electron. Technol.*, 2006, **26**(6): 430~433
司立宏, 敖发良, 何宁. 激光在海水界面上的传输特性分析[J]. *桂林电子科技大学学报*, 2006, **26**(6): 430~433
- 4 Wang Yanfeng, Ding Yongyao. A comparative study on the technique for observation of shortwave using optical means[J]. *J. Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1999, **17**(1): 35~39
王岩峰, 丁永耀. 光学观测小波方法的比较研究[J]. *黄渤海海洋*, 1999, **17**(1): 35~39
- 5 Ma Jie, Tian Jinwen, Liu Jian *et al.*. Numeric imitation and dynamic simulation of three-dimensional ocean wave [J]. *J. System Simulation*, 2001, **13**(s2): 39~41,44
马杰, 田金文, 柳健等. 三维海浪场的数值模拟及其动态仿真[J]. *系统仿真学报*, 2001, **13**(s2): 39~41,44
- 6 C. S. Cox, Xin Zhang. Optical methods for study of sea surface roughness and macroscale turbulence [C]. *SPIE*, 1997, **3172**: 167~174
- 7 C. S. Cox, W. Munk. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter [J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 1954, **44**(11): 838~850
- 8 S. Karp. Optical communication between underwater and above surface (satellite) terminals [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1976, **24**(1): 66~81
- 9 K. I. Gjerstad, J. J. Stamnes, B. Hamre *et al.*. Monte Carlo and discrete-ordinate simulations of irradiances in the coupled atmosphere-ocean system [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(15): 2609~2622
- 10 H. M. Tulldahl, K. O. Steinvall. Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(12): 2462~2483
- 11 L. Sjöqvist, M. Henriksson, O. Steinvall. Simulation of laser beam propagation over land and sea using phase screens-a comparison with experimental data [C]. *SPIE*, 2005, **5989D**: 5989D
- 12 L. E. Estes, G. Fain, J. D. Harris II. Laser beam propagation through the ocean's surface [C]. *Proc. of the Oceans*, 1996, **1**: 87~96